Волновые свойства света

Свет представляет собой сложное явление: в одних случаях он ведет себя как электромагнитная волна, в других — как поток особых частиц (фотонов).

Волновая оптика - круг явлений, в основе которых лежит волновая природа света.

В волновой оптике:

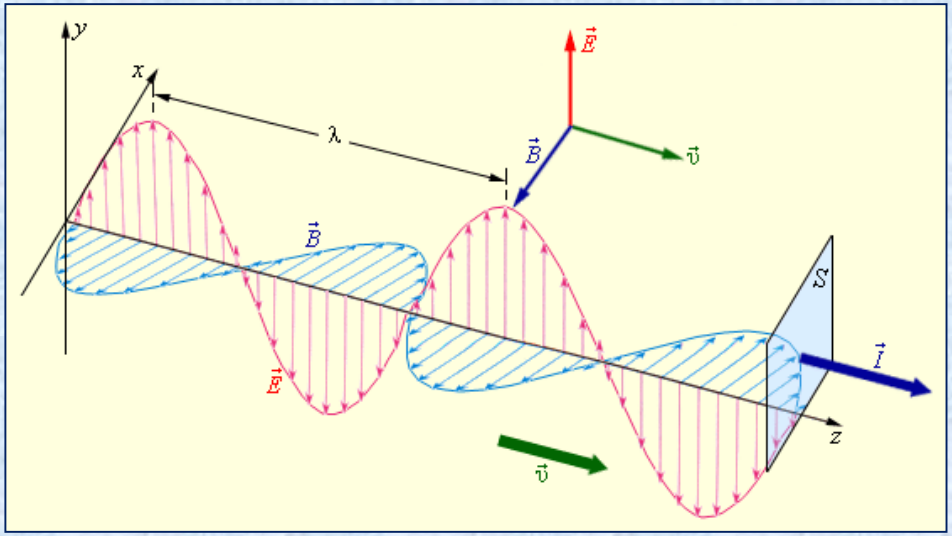
СВЕТ – электромагнитная волна

Уравнение электромагнитной волны

Уравнения электромагнитной волны:

$$E = E_m \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right)\right]; \quad B = B_m \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right)\right]$$

где **E** - напряженность электрического поля в момент времени **t**, $\mathbf{E_m}$ – амплитуда напряженности электрического поля; **B** - магнитная индукция в момент времени **t**; $\mathbf{B_m}$ – амплитуда магнитной индукции.



Векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{\upsilon}$ взаимно перпендикулярны.
ЭМ волны – поперечные.

Световой вектор – вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$

Сложение электромагнитных волн

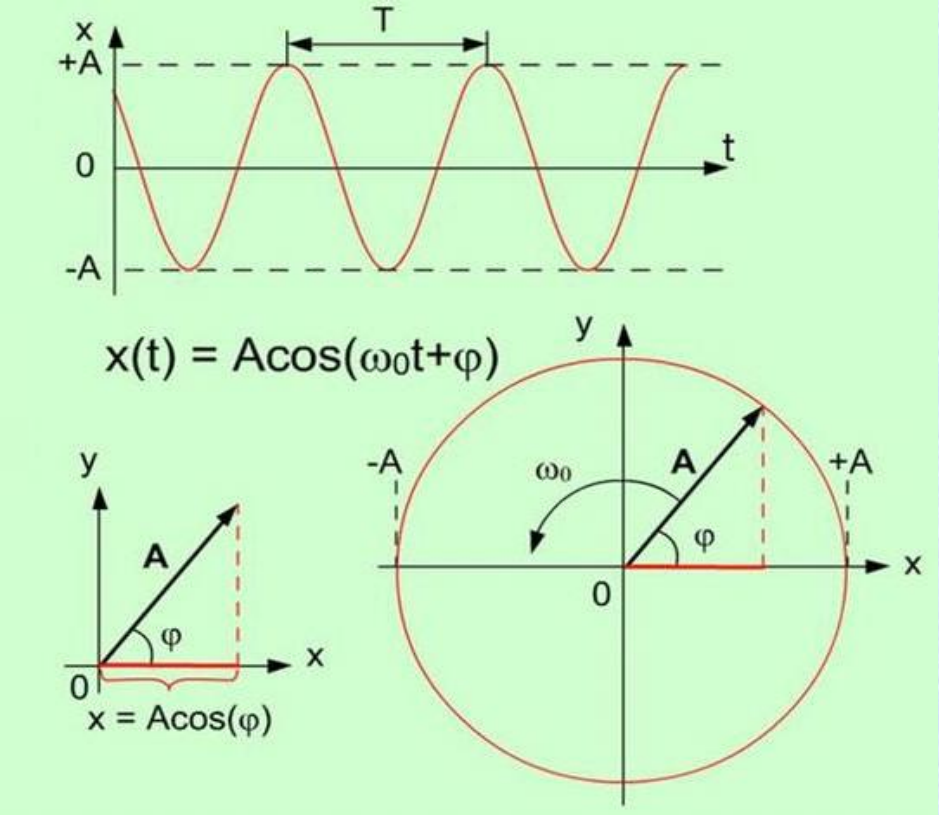
Сложение волн, распространяющихся в среде, определяется сложением в разных точках пространства соответствующих колебаний.

Пусть **две волны одинаковой частоты,** накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

$$E_1 = E_{m1}\cos\left(\omega t + \varphi_1\right)$$

$$E_2 = E_{m2}\cos\left(\omega t + \varphi_2\right)$$

Представим эти колебания в виде векторов (**векторная модель колебаний**).



Сложение электромагнитных волн

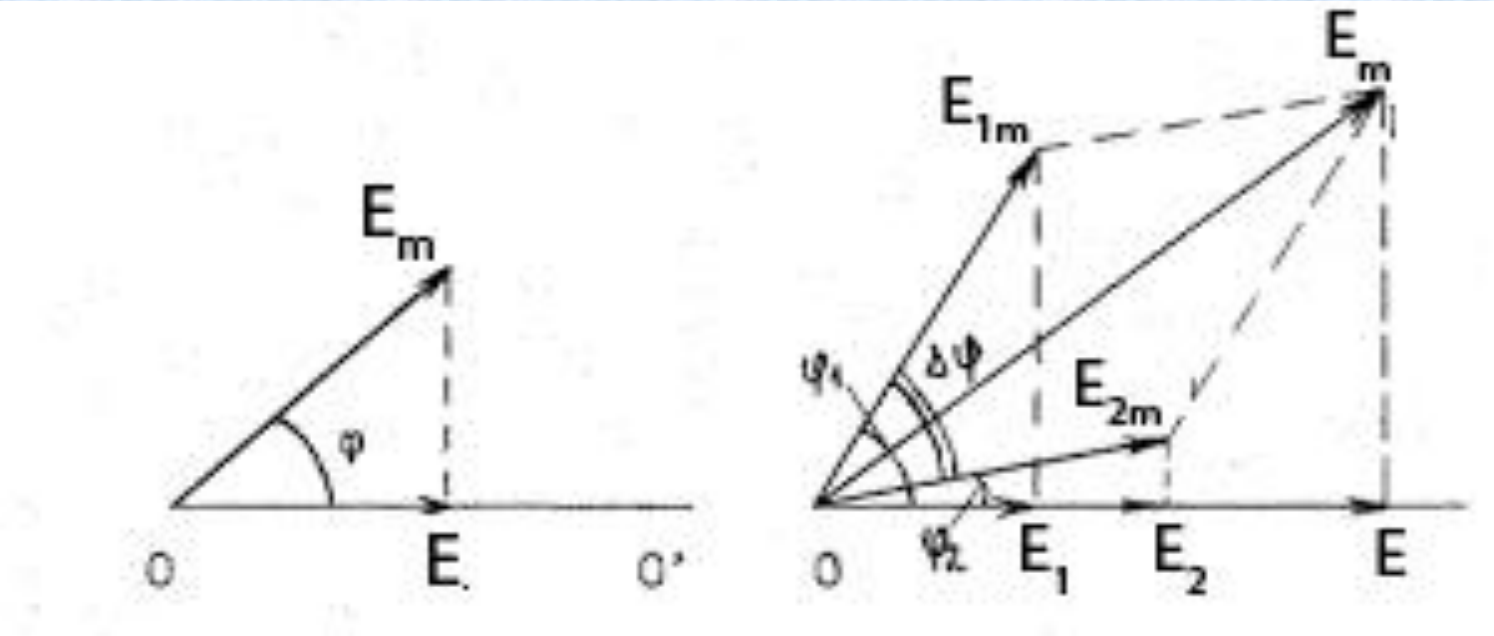
При наложении двух волн одинаковой частоты, получается:

$$\vec{E} = \vec{E_1} + \vec{E_2}$$

$$E_1 = E_{m1}\cos\left(\omega t + \varphi_1\right) \qquad E_2 = E_{m2}\cos\left(\omega t + \varphi_2\right)$$

По теореме косинусов:

$$\boxed{E_m^2 = E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$



Сложение световых волн от «обычных» источников света

$$E_m^2 = E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

В зависимости от типа источников света результат сложения волн может быть принципиально различным.

При сложении волн от «обычных» источников света (лампа, пламя, Солнце и т. п.) разность фаз $(\varphi_2 - \varphi_1)$ меняется случайным образом.

Среднее значение $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ равно нулю:

$$<\cos(\varphi_2 - \varphi_1)>_{среднее} = 0$$

Тогда получаем **усредненное равенство** для тех точек пространства, где складываются две волны, идущие от двух обычных источников света:

$$\left\langle E_m^2 \right\rangle = \left\langle E_{m1}^2 \right\rangle + \left\langle E_{m2}^2 \right\rangle$$

Так как интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды, то из имеем **условие сложения интенсивностей I_1 и I_2** волн:

$$I = I_1 + I_2$$

Сложение световых волн от «обычных» источников света

Правило сложения световых волны от «обычных» источников света:

Интенсивность суммарного излучения «обычных» (естественных) источников равна сумме интенсивностей слагаемых волн.

$$I = I_1 + I_2$$

Интерференция света

$$E_m^2 = E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Если разность фаз $(\varphi_2 - \varphi_1)$ остается постоянной, то волны – **когерентны**.

Интерференция света — это сложение в пространстве двух или нескольких когерентных световых волн, при котором в разных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

В случае когерентных волн $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ имеет постоянное во времени (но свое для каждой точки пространства) значение, поэтому **интенсивность результирующей световой волны:**

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Если $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$ **, то** $I > I_1 + I_2$ **- <u>УСИЛЕНИЕ</u>**

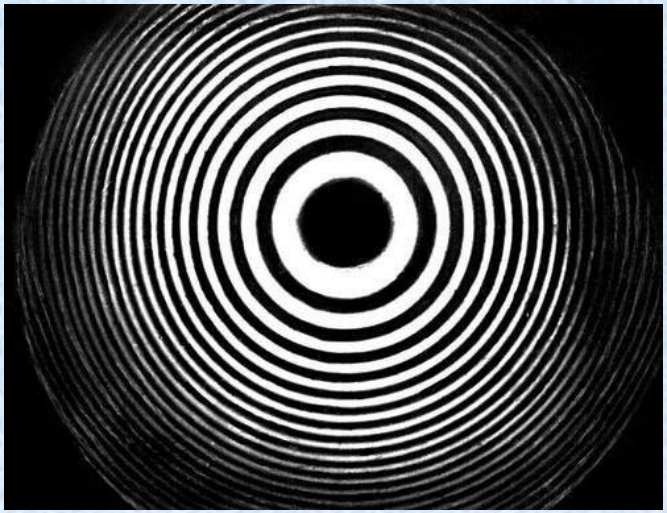
Если $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$ **, то** $I < I_1 + I_2$ **- <u>ОСЛАБЛЕНИЕ</u>**

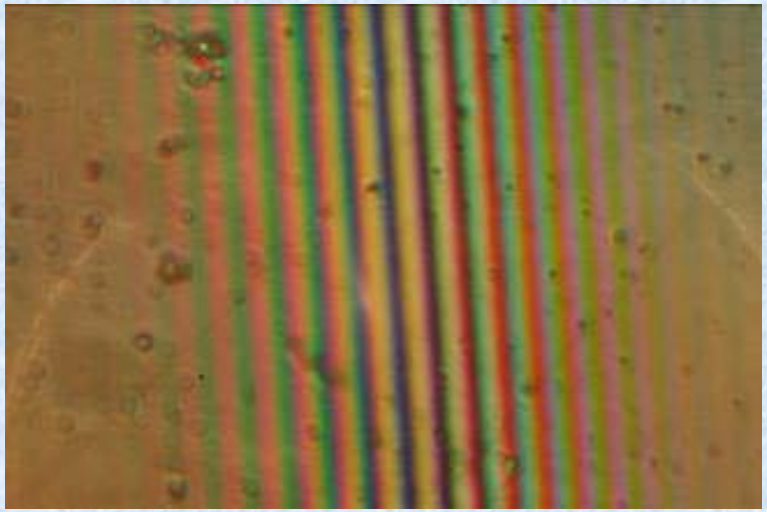
Интерференция света

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

При наложении когерентных световых волн происходит перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего **в одних местах возникают максимумы, а в других—минимумы интенсивности.**

Интерференция могла бы быть осуществлена от двух синусоидальных волн одинаковой частоты, однако на практике создать такие световые волны невозможно, поэтому **когерентные волны получают, «расщепляя» световую волну, идущую от источника.**

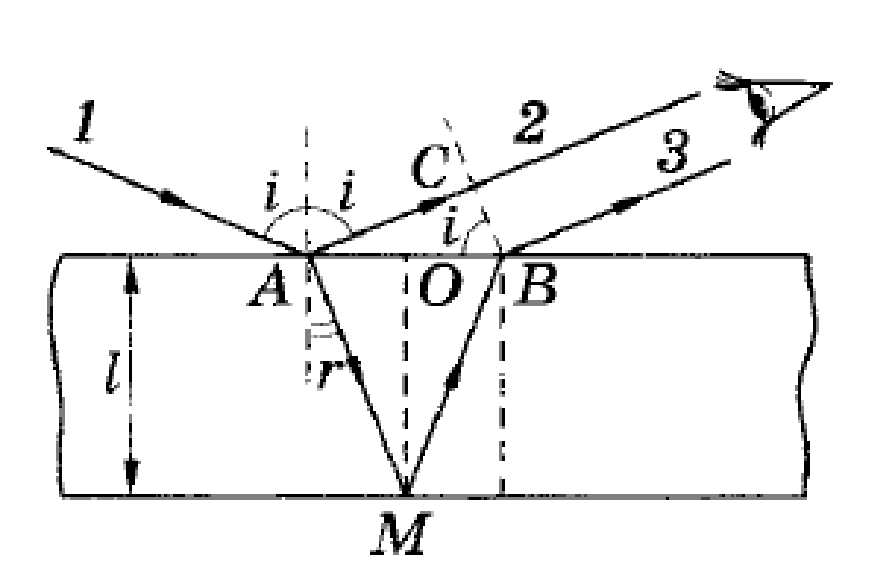


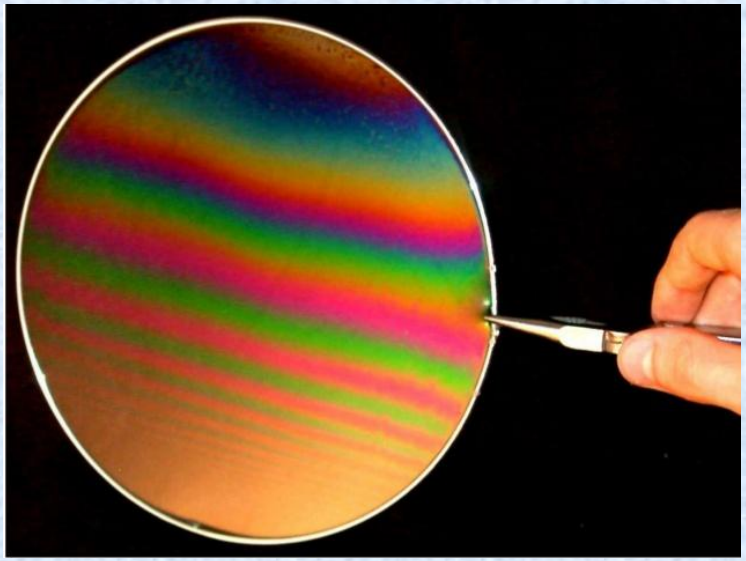


Интерференция в тонких пленках

Образование когерентных волн и интерференция происходят также при попадании света на тонкую прозрачную пластинку или пленку.

Пучок света падает на плоскопараллельную пластинку. Луч 1 из этого пучка попадает в точку А, частично отражается (луч 2), частично преломляется (луч АМ). Преломленный луч испытывает отражение на нижней границе пластинки в точке М. Отраженный луч, преломившись в точке В, выходит в первую среду (луч 3). **Лучи 2 и 3 образованы от одного луча, поэтому они когерентны и будут интерферировать**.





Дифракция. Принцип Гюйгенса—Френеля

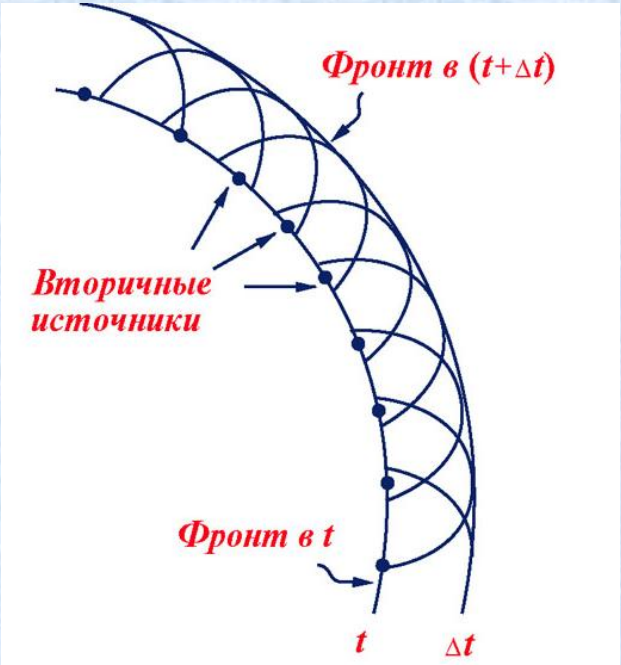
Дифракцией называется огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути, или в более широком смысле — **любое отклонение распространения волн вблизи препятствий от законов геометрической оптики**.

Объяснение и приближенный расчет дифракции света можно осуществить, используя **принцип Гюйгенса—Френеля.**

Гюйгенс: Каждая точка волновой поверхности, которой достигла в данный момент волна, является центром элементарных вторичных волн

Френель: Вторичные волны интерферируют.

принцип Гюйгенса—Френеля:
световая волна, возбуждаемая каким-либо источником S, может быть представлена как результат интерференции когерентных вторичных волн, излучаемых вторичными источниками — бесконечно малыми элементами любой замкнутой поверхности, охватывающей источник S.



Рентгеновское излучение

Рентгеновское излучение - электромагнитные волны с длиной волны от 100 до 10^{-3} нм.

На шкале электромагнитных волн рентгеновское излучение занимает область между УФ-излучением и γ-излучением.

- частота, Гц

- длина волны, м

Устройство рентгеновской трубки

Рентгеновское излучение - электромагнитные волны с длиной волны от 100 до 10^{-3} нм.

На шкале электромагнитных волн рентгеновское излучение занимает область между УФ-излучением и γ-излучением.

Тормозное рентгеновское излучение

В результате торможения электрона электростатическим полем атомного ядра и атомных электронов веществ анода возникает **тормозное рентгеновское излучение.**

Вокруг движущегося электрического заряда возникает магнитное поле, индукция которого зависит от скорости электрона.

При торможении электрона уменьшается магнитная индукция и в соответствии с теорией Максвелла появляется электромагнитная волна.

Свойства тормозного рентгеновского излучения

1. Излучение испускается отдельными квантами, энергии которых связаны с частотой формулой:

$$E = h\nu = hc/\lambda,$$

где ν - частота, λ - длина волны, c – скорость света, h – постоянная Планка.

2. Все электроны, достигающие анода, имеют одинаковую кинетическую энергию, равную работе электрического поля между анодом и катодом:

$$E_к = eU,$$

где e - заряд электрона, U - ускоряющее напряжение.

3. Кинетическая энергия электрона частично передается веществу и идет на его нагревание (Q), а частично расходуется на создание рентгеновского кванта: $eU = Q + h\nu$, или $eU = Q + hc/\lambda$.

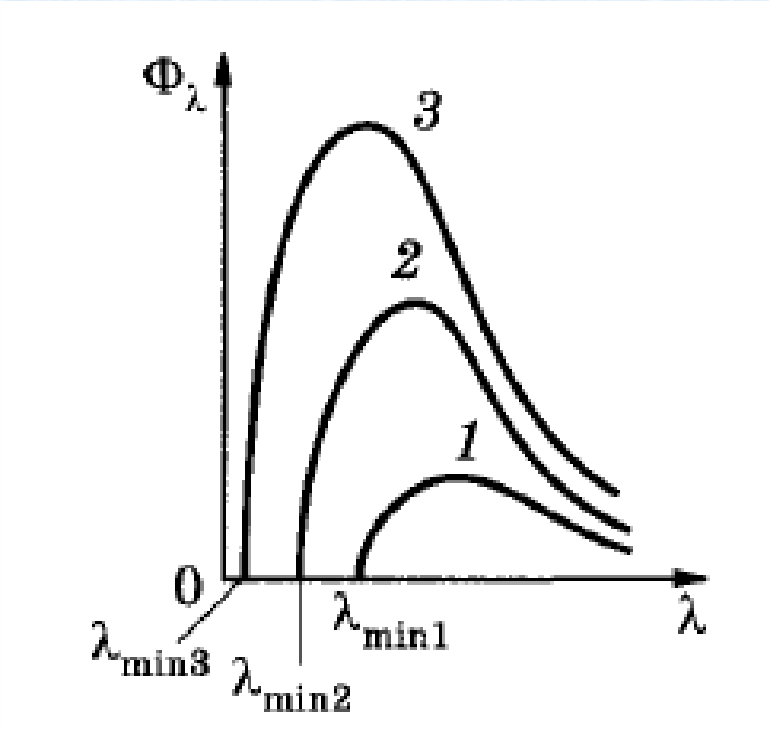
4. Соотношение между Q и hν случайно.

Спектр тормозного рентгеновского излучения

При торможении электронов лишь часть энергии идет на создание фотона рентгеновского излучения, другая часть расходуется на нагревание анода.

$$eU = Q + h\nu, \quad \text{или} \quad eU = Q + hc/\lambda.$$

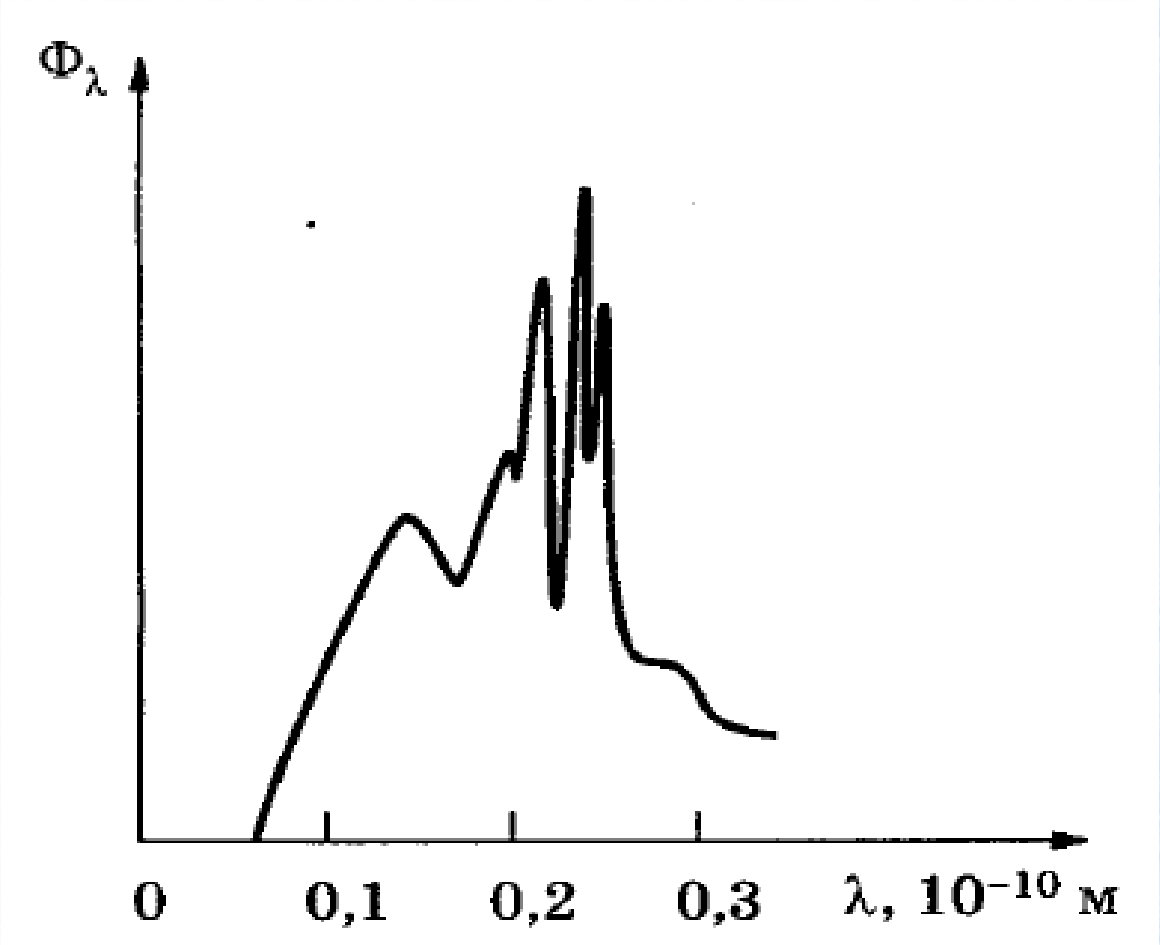
Так как соотношение между этими частями случайно, то при торможении большого количества электронов возникает рентгеновское **излучение с непрерывным (сплошным) спектром.**



Зависимости плотности потока рентгеновского излучения от длины волны λ (спектры) при разных напряжениях на рентгеновской трубке: $U_1 < U_2 < U_3$.

Характеристическое рентгеновское излучение

Увеличивая напряжение на рентгеновской трубке, можно заметить на фоне сплошного спектра появление линейчатого, который соответствует **характеристическому рентгеновскому излучению.**

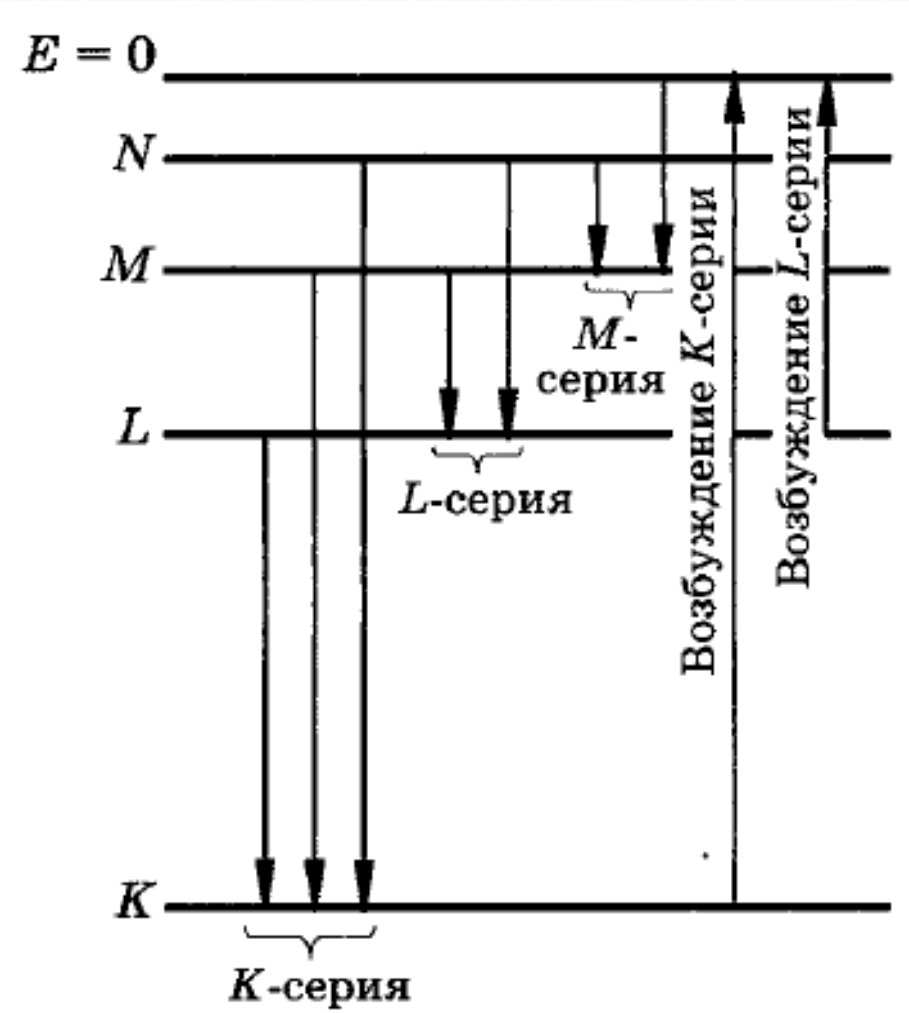


Характеристическое рентгеновское излучение

Характеристическое излучение возникает вследствие того, что **ускоренные электроны проникают в глубь атома и из внутренних слоев выбивают электроны.**

На свободные места переходят электроны с верхних уровней, в результате испускаются фотоны характеристического излучения.

Характеристическое рентгеновское излучение состоит из серий **K**, **L**, **M** и т. д., наименование которых и послужило для обозначения электронных слоев.



Закон Мозли

Характеристические рентгеновские спектры разных атомов однотипны, так как внутренние слои у разных атомов одинаковы и отличаются лишь энергетически, так как силовое воздействие со стороны ядра увеличивается по мере возрастания порядкового номера элемента.

Характеристические спектры сдвигаются в сторону больших частот с увеличением заряда ядра.

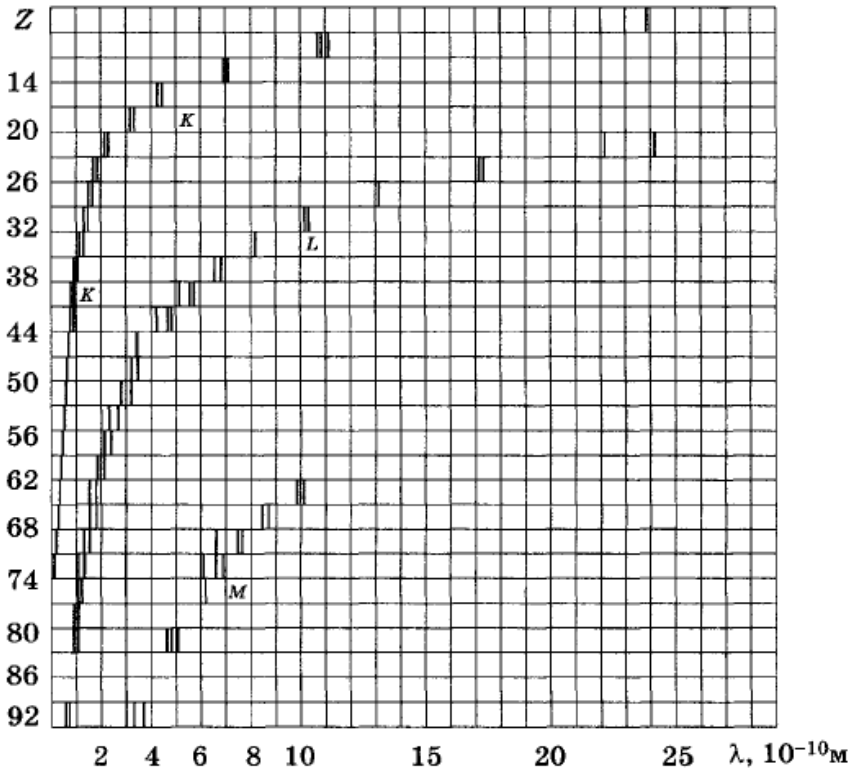
закон Мозли:

$$\sqrt{\nu} = A(Z - B),$$

где **ν** — частота спектральной линии;

Z — атомный номер испускающего элемента;

A и **B** — постоянные.



Свойства характеристического рентгеновского излучения

1. Характеристический рентгеновский спектр атома не зависит от химического соединения, в которое этот атом входит.

Так, например, рентгеновский спектр атома кислорода одинаков для O, O_2 и H_2O, в то время как оптические спектры этих соединений существенно различны.

2. Характеристическое излучение возникает всегда при наличии свободного места во внутренних слоях атома независимо от причины, которая его вызвала.

Так, например, характеристическое излучение сопровождает один из видов радиоактивного распада, который заключается в захвате ядром электрона с внутреннего слоя.

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

В зависимости от соотношения **энергии $h\nu$ фотона** и **энергии ионизации $A_и$** (энергия, необходимую для удаления внутренних электронов за пределы атома или молекулы) имеют место

три главных процесса:

1. **Когерентное (классическое) рассеяние;**

2. **Некогерентное рассеяние (эффект Комптона);**

3. **Фотоэффект.**

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

1. Когерентное (классическое) рассеяние

Рассеяние длинноволнового рентгеновского излучения происходит в основном **без изменения длины волны**, и его принято называть когерентным. **Оно возникает, если энергия фотона меньше энергии ионизации:**

$$h\nu < A_и.$$

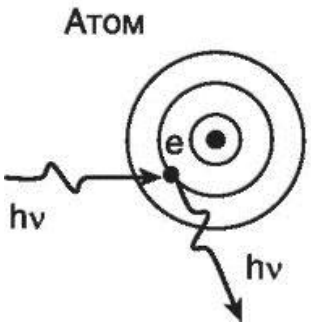


Схема когерентного рассеяния

Так как в этом случае энергия фотона рентгеновского излучения и атома не изменяется, то **когерентное рассеяние само по себе не вызывает биологического действия**. Однако при создании защиты от рентгеновского излучения следует учитывать возможность изменения направления первичного пучка. Этот вид взаимодействия имеет значение для рентгеноструктурного анализа.

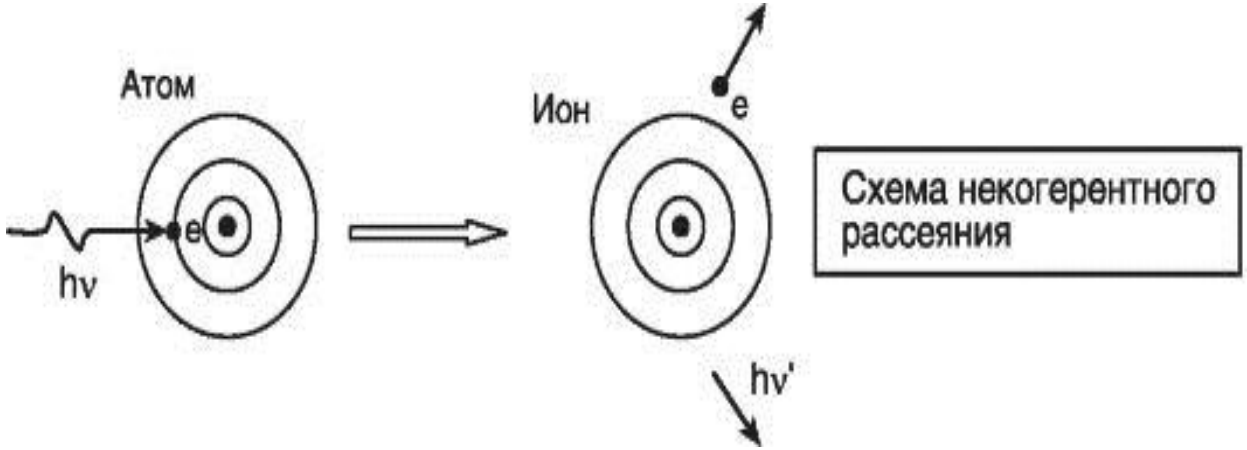
Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

2. Некогерентное рассеяние (эффект Комптона)

Рассеяние рентгеновского излучения **с изменением длины волны** принято называть некогерентным, а само явление — эффектом Комптона.

Некогерентное (комптоновское) рассеяние происходит тогда, когда энергия фотона намного больше энергии внутренней ионизации:

$h\nu >> A_и$.



Наряду с вторичным рентгеновским излучением (энергия ***hν'*** *фотона) появляются* ***электроны отдачи*** *(кинетическая энергия* $E_к$ *электрона).*

Атомы или молекулы при этом становятся ионами.

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

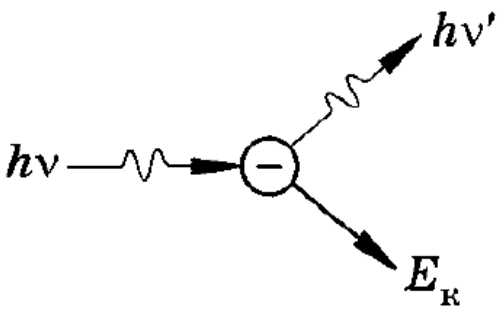
2. Некогерентное рассеяние (эффект Комптона)

Это явление обусловлено тем, что при взаимодействии с атомом энергия **hν** фотона расходуется на образование нового рассеянного фотона рентгеновского излучения с энергией **hν'**, на отрыв электрона от атома (энергия ионизации $\mathbf{A_и}$) и сообщение электрону кинетической энергии $\mathbf{E_к}$:

$$h\nu = h\nu' + A_и + E_к$$

Так как обычно $\mathbf{h\nu >> A_и}$, и тогда эффект Комптона происходит как бы на свободных электронах, то можно записать приближенно

$$h\nu \approx h\nu' + E_к$$



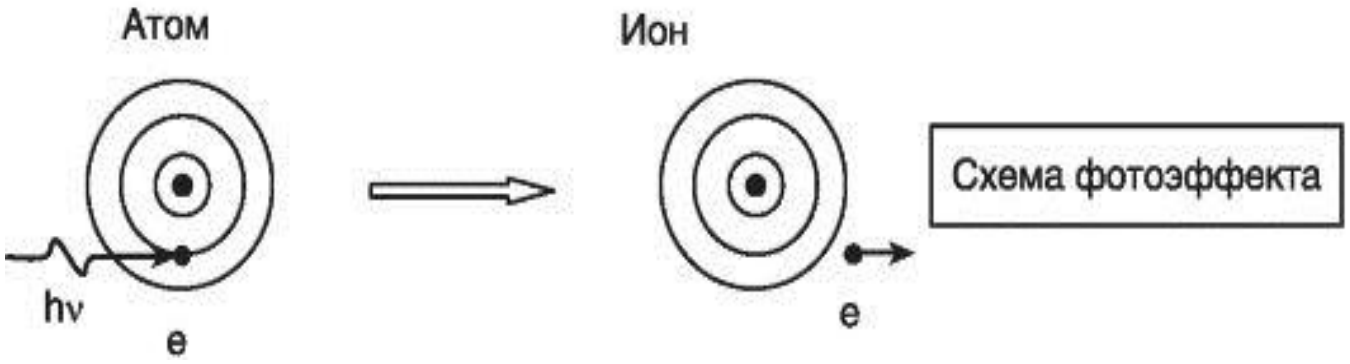
Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

3. Фотоэффект

При фотоэффекте рентгеновское излучение поглощается атомом, в результате чего **вылетают электроны** из глубоких оболочек атома.

Фотоэффект имеет место тогда, когда энергия фотона hν достаточна для ионизации атома:

$$h\nu > A_и.$$



Комптоновское рассеяние и фотоэффект сопровождаются характеристическим рентгеновским излучением, так как после выбивания внутренних электронов происходит заполнение вакантных мест электронами внешних оболочек.

Действие рентгеновского излучения на вещество

1. **Рентгенолюминесценция — свечение ряда веществ при рентгеновском облучении.** Такое свечение платиносинеродистого бария позволило Рентгену открыть лучи. Это явление используют для создания специальных светящихся экранов с целью визуального наблюдения рентгеновского излучения, иногда для усиления действия рентгеновских лучей на фотопластинку.

2. **Химическое действие** рентгеновского излучения, **например образование перекиси водорода в воде**. Практически важный пример — воздействие на фотопластинку, что позволяет фиксировать такие лучи.

3. **Ионизирующее действие** проявляется в **увеличении электропроводимости под воздействием рентгеновских лучей**. Это свойство используют в дозиметрии для количественной оценки действия этого вида излучения.

Ослабление рентгеновского излучения

В результате многих процессов первичный **пучок рентгеновского излучения ослабляется в соответствии с законом**:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}$$

где **μ** — линейный коэффициент ослабления,
x – глубина проникновения,
Φ_0 – поток падающего на среду рентгеновского излучения,
Φ – поток рентгеновского излучения после ослабления средой.

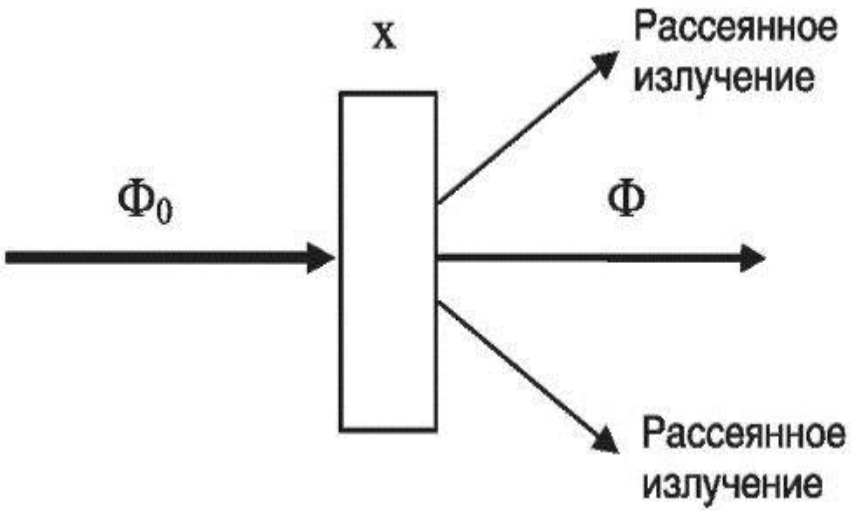
Линейный коэффициент ослабления:

$$\mu = \mu_к + \mu_{нк} + \mu_ф$$

где $\mu_к$ соответствует когерентному рассеянию ,

$\mu_{нк}$ - некогерентному,

$\mu_ф$ – фотоэффекту.



Ослабление рентгеновского излучения

Поток рентгеновского излучения ослабляется пропорционально числу атомов вещества, через которое этот поток проходит.

Если сжать вещество вдоль оси X, например, в **b** раз, увеличив в **b** раз его плотность, то ослабление пучка не изменится, так как число атомов остается прежним. Следовательно, показатель степени в формуле не изменится:

$$\mu_1 x_1 = \mu_2 x_2 = \mu_2 x_1 / b$$

$$x_2 = x_1/b,$$

так как при сжатии толщина поглощающего слоя уменьшилась в **b** раз.

$$\mu_1 = \mu_2/b,$$

Это означает, что линейный коэффициент ослабления μ зависит от плотности вещества.

Массовый коэффициентом ослабления μ_m, который равен отношению линейного коэффициента ослабления к плотности поглотителя и не зависит от плотности вещества:

$$\mu_m = \mu/\rho$$

Применение рентгеновского излучения в медицине

Рентгенодиагностика

Рентгенодиагностика - метод получения изображений внутренних органов с использованием рентгеновских лучей.

Для диагностики используют фотоны с энергией порядка 60-120 кэВ. При этой энергии **массовый коэффициент ослабления** в основном **определяется фотоэффектом**. Его значение обратно пропорционально третьей степени энергии фотона (пропорционально λ^3), в чем проявляется большая проникающая способность жесткого излучения, и пропорционально третьей степени атомного номера вещества-поглотителя:

$$\mu_m = k\lambda^3 Z^3$$

где μ_m – массовый коэффициент ослабления; λ – длина волны;
Z – атомный номер элемента вещества-поглотителя;
k – коэффициент пропорциональности.

Применение рентгеновского излучения в медицине

Рентгенодиагностика

$$\mu_m = k\lambda^3 Z^3$$

Поглощение рентгеновских лучей почти не зависит от того, в каком соединении атом представлен в веществе, поэтому можно легко сравнить по формуле массовые коэффициенты ослабления $\mu_{mк}$ кости $Ca_3(PO_4)_2$ и $\mu_{mв}$ мягкой ткани или воды H_2O. Атомные номера Ca, P, O и H соответственно равны 20, 15, 8 и 1. Подставив эти числа в формулу, получим:

$$\frac{\mu_{mк}}{\mu_{mв}} = \frac{3 \cdot 20^3 + 2 \cdot 15^3 + 8 \cdot 8^3}{2 \cdot 1^3 + 8^3} = 68$$

Плотность кости также выше плотности мягких тканей. Поэтому на рентгеновском снимке получается светлое изображение кости на более темном фоне мягких тканей.

Методы рентгенодиагностики

1. Рентгеноскопия

Изображение формируется на флуоресцирующем экране. Яркость изображения невелика, и его можно рассматривать только в затемненном помещении. Врач должен быть защищен от облучения.

Достоинство: проводится в реальном режиме времени.

Недостаток: большая лучевая нагрузка на больного и врача (по сравнению с другими методами).

Современный вариант рентгеноскопии - рентгенотелевидение - использует усилители рентгеновского изображения. Усилитель воспринимает слабое свечение рентгеновского экрана, усиливает его и передает на экран телевизора. В результате резко уменьшилась лучевая нагрузка на врача, повысилась яркость изображения и появилась возможность видеозаписи результатов обследования.

Методы рентгенодиагностики

2. Рентгенография

Изображение формируется на специальной пленке, чувствительной к рентгеновскому излучению.

Снимки производятся в двух взаимно перпендикулярных проекциях (прямая и боковая). Изображение становится видимым после фотообработки. Готовый высушенный снимок рассматривают в проходящем свете. При этом удовлетворительно видны детали, контрастности которых отличаются на 1-2 %.

Достоинства: высокое разрешение, малое время облучения и практически полная безопасность для врача.

Недостаток: статичность изображения (объект нельзя проследить в динамике).

В некоторых случаях перед обследованием пациенту вводится специальное контрастное вещество. Например, йодсодержащий раствор (внутривенно) при исследовании почек и мочевыводящих путей.

Методы рентгенодиагностики

3. Флюорография

Изображение, полученное на экране, фотографируется на чувствительную малоформатную пленку.

Флюорография широко используется при массовом обследовании населения. Если на флюорограмме находят патологические изменения, то пациенту назначают более детальное обследование.

4. Электрорентгенография

Вместо пленки используют селеновую пластину, которая электризуется под действием рентгеновских лучей.

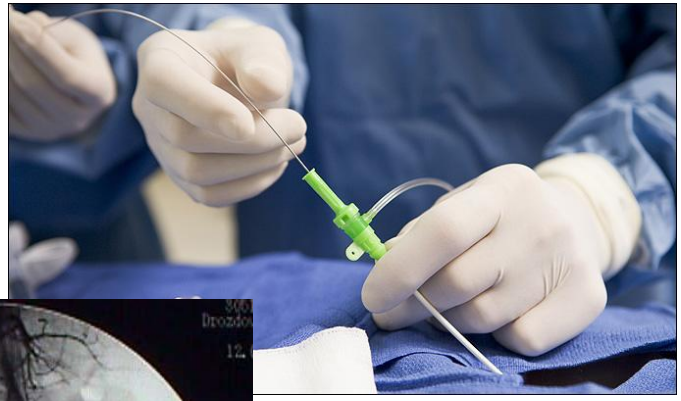
В результате возникает скрытое изображение из электрических зарядов, которое можно сделать видимым и перенести на бумагу.

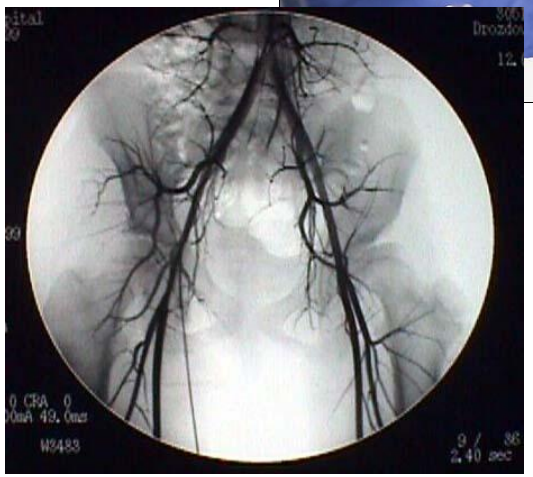
Методы рентгенодиагностики

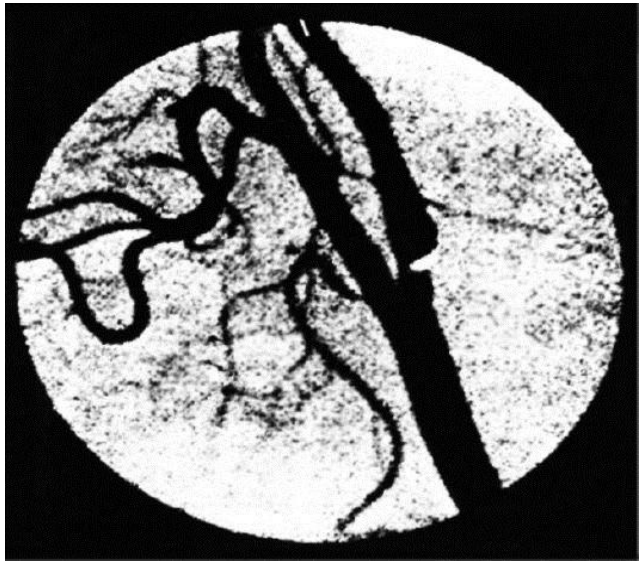
5. Ангиография

Этот метод применяется при обследовании кровеносных сосудов.

Через катетер в вену вводится контрастное вещество, после чего мощный рентгеновский аппарат выполняет серию снимков, следующих друг за другом через доли секунды.







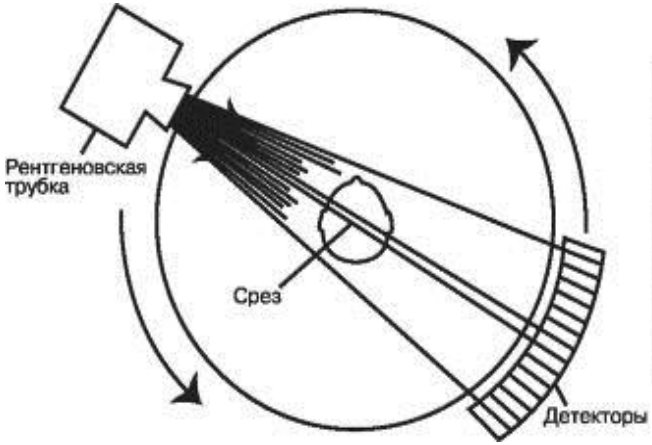
Ангиограмма, на которой видно сужение в канале сонной артерии

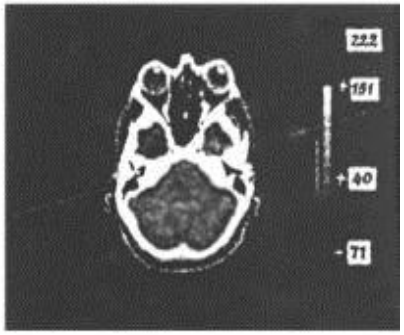
Методы рентгенодиагностики

6. Компьютерная томография

Этот вид рентгеновского обследования позволяет получить изображение плоского сечения тела толщиной несколько мм. При этом заданное сечение многократно просвечивается под разными углами с фиксацией каждого отдельного изображения в памяти компьютера. Затем осуществляется компьютерная реконструкция, результатом которой является изображение сканируемого слоя.

Компьютерная томография позволяет различать элементы с перепадом плотности между ними до 1 %. Обычная рентгенография позволяет уловить минимальную разницу по плотности между соседними участками в 10-20 %.





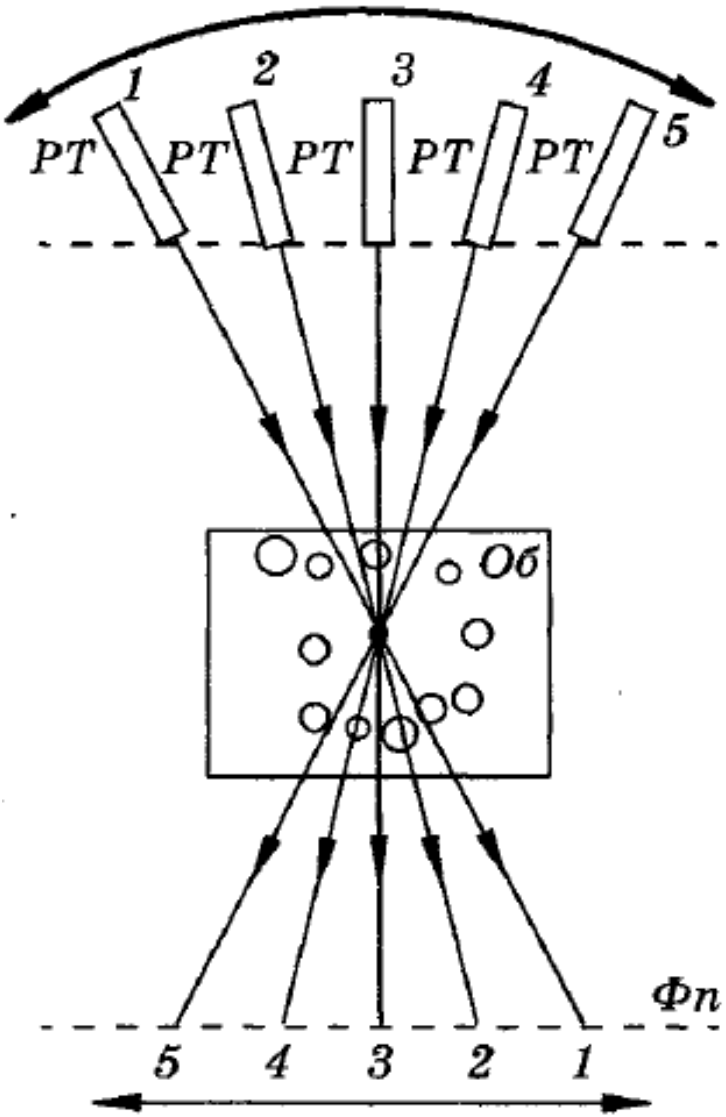
Сканирующая схема компьютерной томографии (а); томограмма головы в сечении на уровне глаз (б).

Методы рентгенодиагностики

6. Компьютерная томография

Рентгеновская трубка **РТ** и фотопленка **Фп** периодически совместно перемещаются относительно объекта исследования **Об**.

Как видно, рентгеновские лучи при любом положении рентгеновской трубки (1, 2 и т. д.) проходят через одну и ту же точку объекта, являющуюся центром, относительно которого совершается периодическое движение **РТ** и **Фп**. Его теневое изображение перемещается вместе с **Фп**, занимая последовательно положения 1, 2 и т. д. Остальные включения в теле (кости, уплотнения и др.) создают на **Фп** некоторый общий «фон», так как рентгеновские лучи непостоянно затеняются ими. Изменяя положение «центра качания» можно получить послойное рентгеновское изображение тела.



Рентгенотерапия

Рентгенотерапия - использование рентгеновского излучения для уничтожения злокачественных образований.

Биологическое действие излучения заключается в нарушении жизнедеятельности особенно быстро размножающихся клеток.

Очень жесткое рентгеновское излучение (с энергией фотонов примерно 10 МэВ) используется для разрушения раковых клеток, находящихся глубоко внутри тела.

Для уменьшения повреждений здоровых окружающих тканей пучок вращается вокруг пациента таким образом, чтобы под его воздействием все время оставалась только поврежденная область.

Радиоактивность

Радиоактивностью называют самопроизвольный распад неустойчивых ядер с испусканием других ядер или элементарных частиц.

Радиоактивность

Естественная

Искусственная

Естественная радиоактивность встречается у неустойчивых ядер, существующих в природных условиях

Искусственной называют радиоактивность ядер, образованных в результате различных ядерных реакций.

Строение атомных ядер

Атомные ядра состоят из **протонов и нейтронов,** которые имеют обобщающее название **- нуклоны.**

Количество протонов в ядре определяет химические свойства атома и обозначается **Z** (это порядковый номер химического элемента).

Количество нуклонов в ядре называют массовым числом и обозначают **A**.

Строение атомных ядер

Ядра с одинаковым порядковым номером и различными массовыми числами называются **изотопами**.

Все изотопы одного химического элемента имеют одинаковые химические свойства. Физические свойства изотопов могут различаться весьма сильно.

Способность ядра к распаду зависит от его состава. У одного и того же элемента могут быть и стабильный, и радиоактивный изотопы. Например, изотоп углерода ^{12}C стабилен, а изотоп ^{14}C радиоактивен.

Типы радиоактивного распада

Альфа-распад (α-распад)

Альфа-распад состоит в самопроизвольном превращении одного ядра в другое ядро с испусканием **α-частицы** (ядра атома гелия ^{2}He).

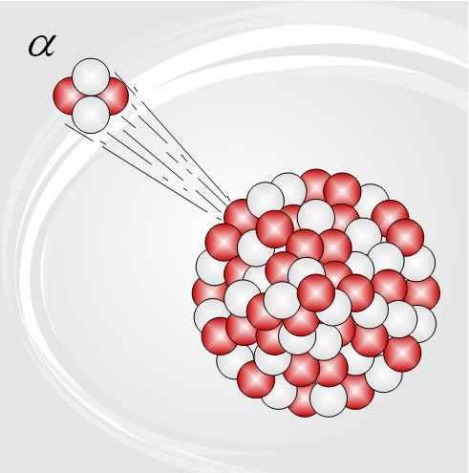


Схема альфа-распада:

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\alpha + h\nu ,$$

где **X** и **Y**— символы соответственно материнского и дочернего ядер;
hν - квант энергии, испускаемой ядром (**γ**-излучение).

Пример (превращение радона в полоний, а полония в свинец):

$$^{222}_{86}Rn \rightarrow {}^{218}_{84}Po + {}^{4}_{2}\alpha \quad \text{и} \quad {}^{218}_{84}Po \rightarrow {}^{214}_{82}Pb + {}^{4}_{2}\alpha$$

Альфа-распад сопровождается γ-излучением.

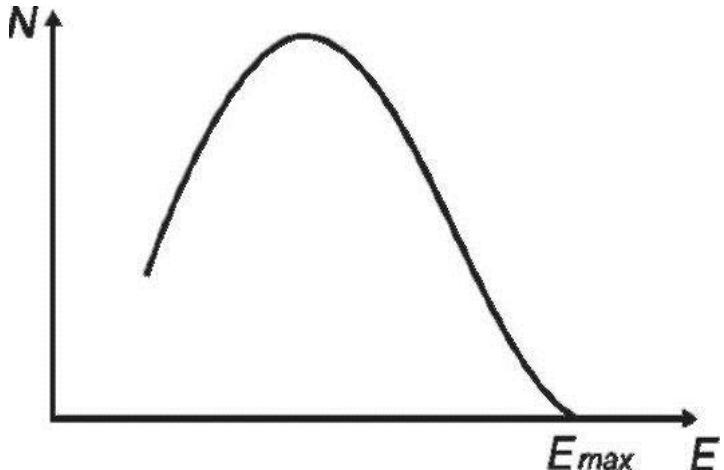
Типы радиоактивного распада

Бета-распад (β-распад)

Бета-распад заключается во внутриядерном взаимном превращении нейтрона и протона.

Установлено, что β-распад всегда сопровождается испусканием нейтральной частицы - нейтрино (или антинейтрино).

Эта частица практически не взаимодействует с веществом, и в дальнейшем рассматриваться не будет. Энергия, выделяющаяся при β-распаде, распределяется между β-частицей и нейтрино случайным образом. Поэтому **энергетический спектр β-излучения сплошной.**



При β-распаде возможно возникновение γ-излучения.

Типы радиоактивного распада

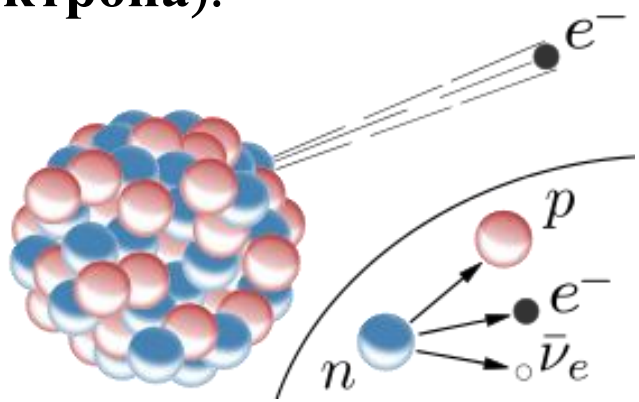
Виды бета-распада

1. Электронный (β^-) распад:

проявляется в вылете из ядра **β^-** -частицы (**электрона**).

Схема **β^-** -распада

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}\beta + \tilde{\nu}$$



где $\tilde{\nu}$ — антинейтрино.

Пример электронного β-распада (превращение тритий в гелий)**:**

$$^{3}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{0}_{-1}\beta + \tilde{\nu}$$

При β^--распаде электрон образуется вследствие внутриядерного превращения нейтрона в протон:

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}_{+}{}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}\beta + \tilde{\nu}$$

Типы радиоактивного распада

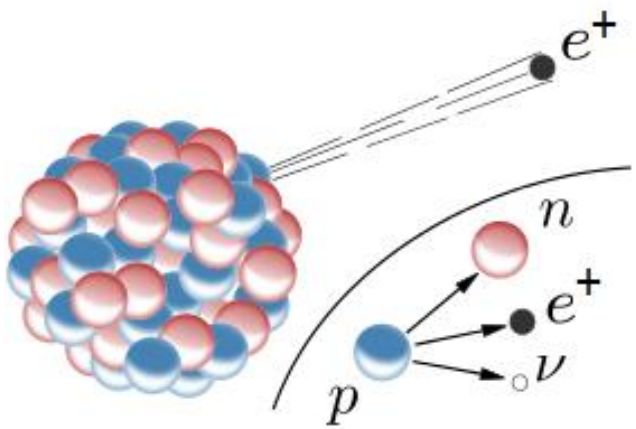
Виды бета-распада

2. Позитронный (β^+) распад:

проявляется в вылете из ядра **β^+** -частицы (**позитрона**).

Схема **β^+** -распада

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z-1}Y + ^{0}_{+1}\beta + \nu$$



где ν — нейтрино.

Пример позитронного β-распада (превращение рубидия в криптон):

$$^{79}_{37}Rb \rightarrow ^{79}_{36}Kr + ^{0}_{+1}\beta + \nu$$

При β^+-распаде позитрон образуется вследствие внутриядерного превращения протона в нейтрон:

$$^{1}_{+1}p \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{0}_{+1}\beta + \nu$$

Типы радиоактивного распада

Виды бета-распада

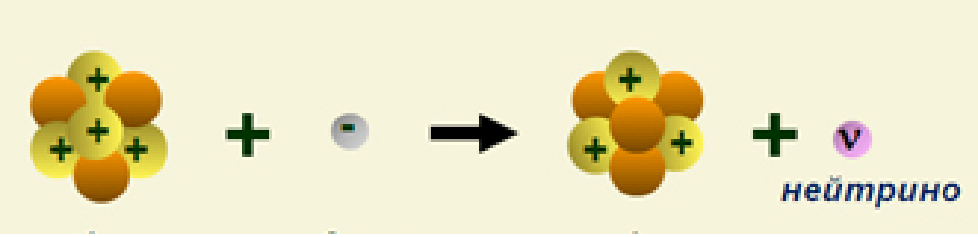
3. Электронный (е-) захват:

заключается в захвате ядром одного из внутренних электронов атома.

Схема **электронного захвата**

$$^{A}_{Z}X + ^{0}_{-1}\beta \rightarrow ^{A}_{Z-1}Y + \nu$$

где **ν** — нейтрино.



Пример электронного захвата (превращение бериллия в литий)**:**

$$^{7}_{4}Be + ^{0}_{-1}\beta \rightarrow ^{7}_{3}Li + \nu$$

В результате ядром одного из внутренних электронов атома, в результате чего протон ядра превращается в нейтрон: $^{1}_{+1}p + ^{0}_{-1}\beta \rightarrow ^{1}_{0}n + \nu$

Типы радиоактивного распада

Гамма-излучение (γ-излучение)

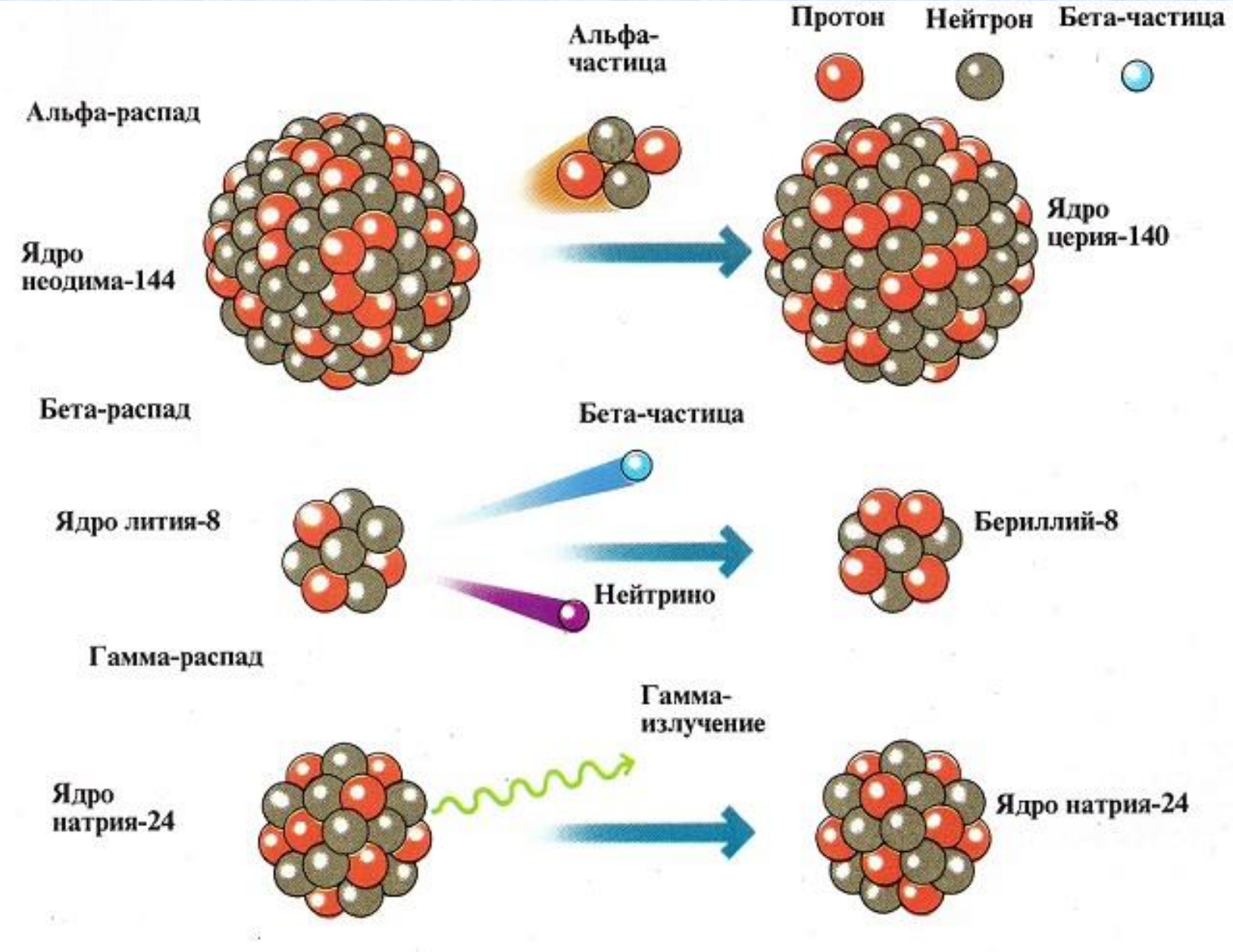
Гамма-излучение имеет электромагнитную природу и представляет собой фотоны с длиной волны $\lambda \leq 10^{-10}$ м.

Гамма-излучение не является самостоятельным видом радиоактивного распада.

Излучение этого типа почти всегда сопровождает не только α-распад и β-распад, но и более сложные ядерные реакции.

Оно не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей и очень большой проникающей способностями

Типы радиоактивного распада (примеры)

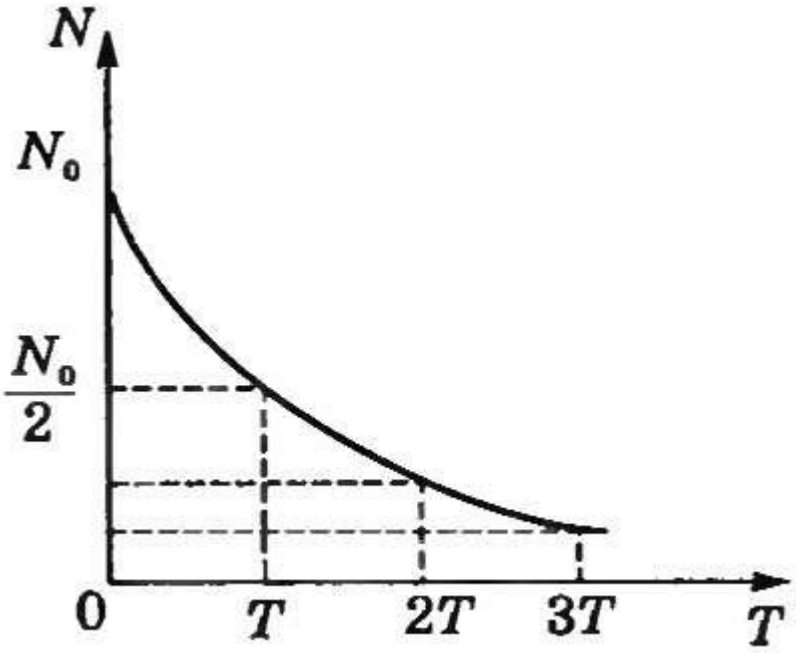


Основной закон радиоактивного распада

Радиоактивный распад – это статистическое явление. Невозможно предсказать, когда распадется данное нестабильное ядро, можно лишь предсказать определенную вероятность этого события. Однако, для большой совокупности ядер можно получить статистический закон, выражающий зависимость числа нераспавшихся ядер от времени.

Основной закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$



где ***N*** – число радиоактивных ядер, спустя время t;

N_0 – число радиоактивных ядер в начальный момент времени;

T – период полураспада; ***t*** – время.

Использование радионуклидов в медицине

Диагностическое применение основано на избирательном накоплении некоторых химических элементов отдельными органами.

Йод, например, концентрируется в щитовидной железе, а кальций - в костях.

Введение в организм радиоизотопов этих элементов позволяет обнаруживать области их концентрации по радиоактивному излучению и получать таким образом важную диагностическую информацию. Такой метод диагностики называется **методом меченых атомов.**

Принципы радионуклидных методов диагностики

В основе радионуклидной диагностики лежит использование радионуклидов или меченых ими химических соединений. Все радионуклидные методики связаны с введением радиофармацевтических препаратов в организм больного или в извлеченные из организма ткани или жидкости.

Вводимые в организм радионуклиды обычно являются источниками гамма-излучения, которое регистрируется специальными детекторами.

Методы радионуклидной диагностики

- **Радиография (гамма-хронография)**
- **Гамма-топография**
- **Позитрон-эмиссионная томография**

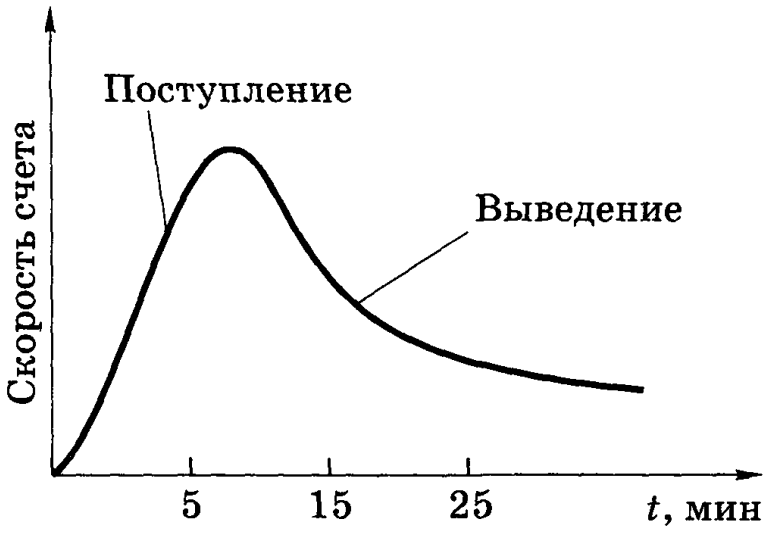
Радиография (гамма-хронография)

Радиография – метод функционального исследования, в основе которого лежит изучение зависимости интенсивности γ-излучения органа (после введения радиофармацевтического препарата) от времени.

Посредством радиографии можно судить о движении крови по сосудам и камерам сердца, функционировании печени, почек и т.д.

ПРИМЕР: Радиографическое исследование почек

Радиоактивный препарат, введенный внутривенно, приносится с кровью в артерии почек, появляется γ-излучение в области почек. Затем содержимое канальцев стекает и в течение нескольких минут создается равновесие между поступлением и убыванием препарата. Затем отток преобладает и количество γ-квантов уменьшается. Полученная кривая дает информацию о функционировании почек.



Гамма-хронограмма почек

Гамма-топография

Гамма-топография – клинико-анатомическое исследование, которое основано на изучении пространственного распределения радионуклидов, накапливающихся в органе.

Гамма-топография дает информацию о локализации, величине и положении органа, распределении в нем функциональной ткани.

ПРИМЕР: Гамма-топография печени

После внутривенного введения радиоактивного препарата печень здорового человека накапливает его достаточно равномерно. Если же часть функционирующей паренхимы печени заменена соединительной тканью (например, при циррозе), то в этих местах будет накапливаться существенно меньше радионуклидов, чем в здоровой части. Очагам поражения на гамма-топограмме будет соответствовать сниженная интенсивность γ-излучения.

Гамма-топограмма печени

Позитрон-эмиссионная томография

Позитрон-эмиссионная томография – это метод медицинской визуализации, основанный на применении радиофармпрепаратов (РФП), подверженных позитронному (β^+) распаду.

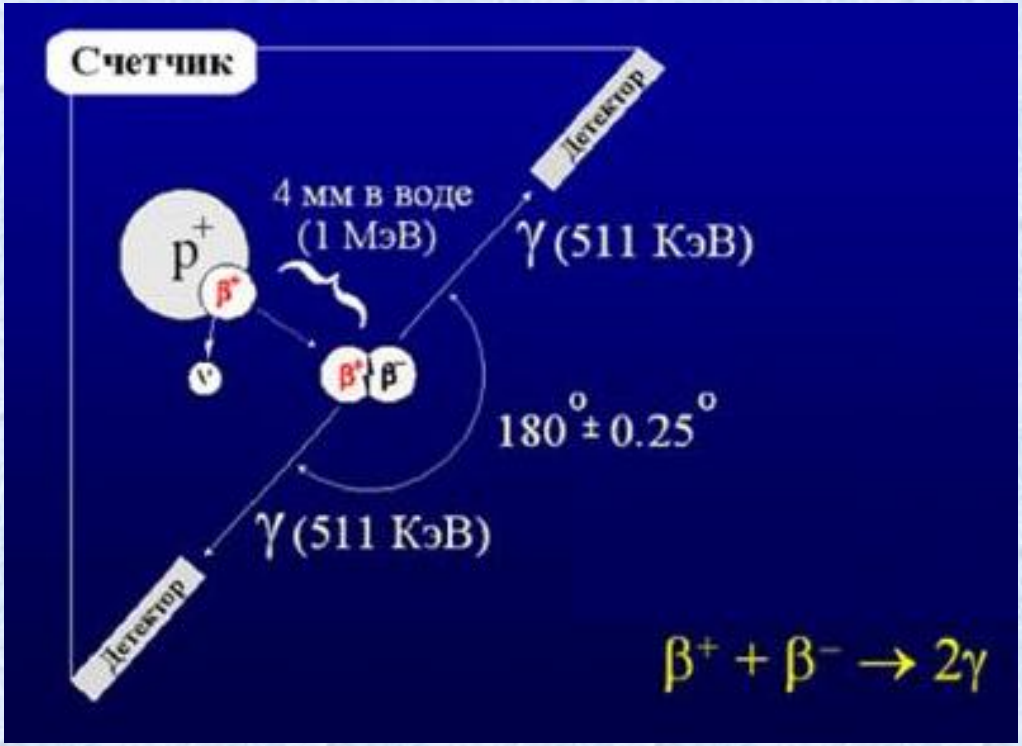
РФП вводится в исследуемый орган, где быстро распадается. Позитрон, испущенный в результате β^+- распада радиоизотопа, проходит в тканях не более 1-3 мм и сталкивается с электроном, в результате чего происходит их аннигиляция, при которой образуются два γ-кванта с энергией >0,51 МэВ, летящие в противоположные стороны:

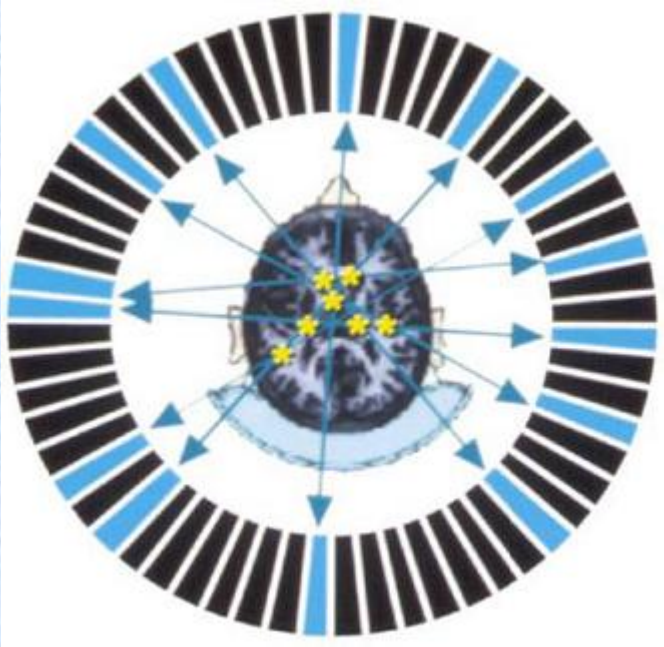
$$\beta^+ + \beta^- = 2\ \gamma\text{-кванта}$$

Блок системы регистрации томографа выделяет γ-кванты, летящие в противоположные стороны, регистрируя «линию ответа». Компьютер суммирует все линии ответа и реконструирует изображение в области, испускающей β^+-частицы.

Применяемые изотопы: ^{11}C (T=20,4 мин), ^{18}F (T=110 мин), ^{15}O (T=2 мин), ^{13}N (T=10 мин).

Позитрон-эмиссионная томография (ПЭТ)





Изображения, создаваемые ПЭТ, отражают функциональные процессы жизнедеятельности органов и тканей человека на молекулярном и клеточном уровне, включая метаболизм глюкозы и утилизацию кислорода, оценку кровотока, оценку концентрации и сродства специфических рецепторов. Многие заболевания диагностируются ПЭТ раньше, чем с помощью компьютерной томографии и МРТ, поскольку изменения на клеточном уровне предшествуют морфологическим.

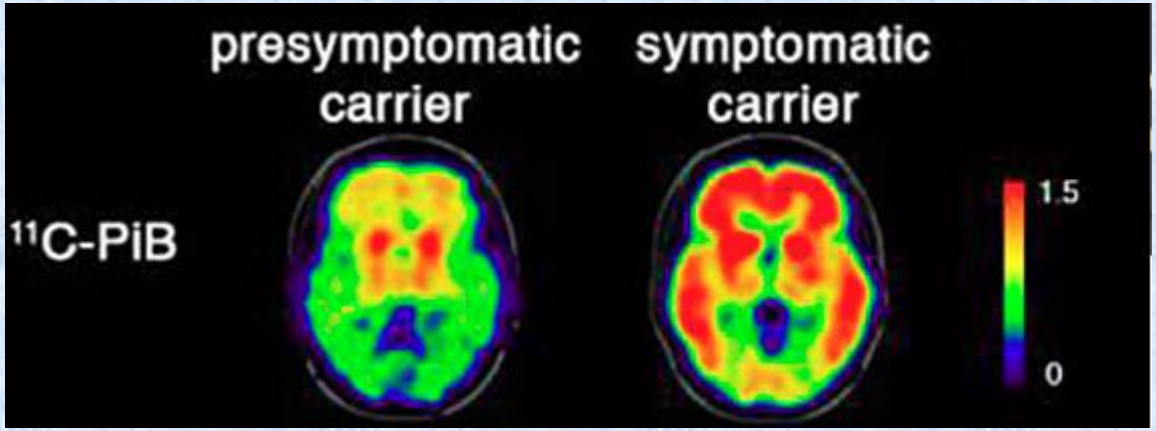
ПЭТ – единственная методика оценки метаболических процессов *in vivo!*

Применение позитрон-эмиссионной томографии (ПЭТ)

В онкологии: позволяет выявить первичный опухолевый очаг, определить степень его злокачественности и оценить распространенность метастаз

В неврологии: применяется для выявления функциональных изменений головного мозга при сосудистых заболеваниях, деменции и др.

В кардиологии: применяется для определения метаболизма глюкозы в миокарде и жизнеспособности кардиомиоцитов.



Лучевая терапия

Терапевтическое использование радионуклидов основано на разрушающем действии ионизирующего излучения на клетки опухолей.

Лучевая терапия – клиническая дисциплина, изучающая применение ионизирующих излучений для лечения болезней. Методы лучевой терапии являются одними из ведущих в онкологии.

При использовании лучевой терапии необходимо наиболее интенсивно воздействовать на очаги патологии при минимальном поглощении энергии в окружающих здоровых тканях.

Виды лучевой терапии

1. **Рентгено-терапия** - **использование рентгеновского излучения** низких и средних энергий при лечении заболеваний, не требующих высокоинтенсивного облучения. Интенсивность рентгеновского излучения резко убывает, в 10 см от поверхности не превышает 20% падающего пучка

2. **Гамма-терапия** - **использование γ-излучения** высокой энергии (источник ^{60}Co) для разрушения глубоко расположенных опухолей. Чтобы поверхностно расположенные ткани и органы не подвергались губительному действию, воздействие ионизирующего излучения осуществляется в разные сеансы по разным направлениям.

3. **Альфа-терапия** - лечебное **использование α-частиц**.

Эти частицы обладают значительной линейной плотностью ионизации и поглощаются даже небольшим слоем воздуха. Поэтому терапевтическое применение альфа-лучей возможно при непосредственном контакте с поверхностью органа или при введении внутрь (с помощью иглы). Для поверхностного воздействия применяется радоновая терапия (^{222}Rn): воздействие на кожу (ванны), органы пищеварения (питье), органы дыхания (ингаляции).

Материал для подготовки по физике (книги, лекции, темы к экзамену) можно скачать здесь:

https://cloud.mail.ru/public/5CXg/sc3NxxsxB